

**И. Я. Чеботарева**

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

# ОСОБЕННОСТИ ТРЕХМЕРНОЙ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ В СРЕДАХ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА ПРИ ВЫКЛИНИВАНИИ СЛОЕВ

Ранее был предложен оригинальный метод трассировки лучей в 3D-средах со сложной геометрией внутренних границ. В данной статье рассмотрена новая модификация метода, позволяющая работать при выклинивании слоев. Чтобы устранить проблемы, возникающие при использовании ординарного алгоритма, скоростную модель доопределяют таким образом, чтобы количество слоев по простиранию не изменялось. При этом на некоторых участках простирания слои могут иметь малую толщину, значение которой задают параметром малости. Внесены изменения в алгоритм 3D-бисекции, а область итерационного поиска точки преломления уменьшена до величины, определяемой параметром локальности. Эффективность метода подтверждена результатами численного моделирования. Разработанный метод необходим для точной привязки источников эмиссионного излучения при проведении сейсмологических и сейсморазведочных исследований, а также работ на месторождениях полезных ископаемых.

**Ключевые слова:** трехмерная трассировка лучей, среды со сложной геометрией внутренних границ, выклинивание пласта.

Для цитирования: Чеботарева И. Я. Особенности трехмерной трассировки лучей в средах со сложной геометрией границ раздела при выклинивании слоев // Радиопромышленность. 2018. № 2. С. 63–70.

**I. Ya. Chebotareva**

Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow, Russia

# FEATURES OF 3D RAY TRACING FOR MEDIA WITH COMPLEX GEOMETRY OF INTERNAL BOUNDARIES IN PRESENCE OF WEDGEDING-OUT OF LAYERS

Previously an original method for ray tracing in 3D environments with a complex internal boundary geometry was proposed. In this article there was proposed a new modification of this method to enable operation in conditions of bed pinching out. To eliminate the problems arising from the use of the ordinary algorithm, the velocity model is additionally defined in such a way that the number of layers along the strike shall not change. Therewith, on some particular areas on the strike the layers may have have a «small thickness», the values thereof being determined by the order of smallness. Changes have been made to the 3D bisection algorithm, and the area of the iterative search for the refraction point has been reduced to the value determined by the locality parameter. The efficiency of the method is proven by the results of numerical simulation. The developed method is necessary for exact tie of sources of radiated emission in the course of seismological and seismic surveys performed, as well as for work performed on mining fields.

**Keywords:** three-dimensional ray tracing, media with a complex internal boundary geometry, pinching-out of bed.

For citation: Chebotareva I. Ya. Features of 3D ray tracing for media with complex geometry of internal boundaries in presence of wedgeding-out of layers. Radiopromyshlennost, 2018, no. 2, pp. 63–70 (In Russian).

## Введение

Задача трассировки лучей в сложноустроенных средах возникает во многих дистанционных методах, в частности в методе эмиссионной сейсмической томографии. Этот метод является мощным инструментом геофизических исследований. Он позволяет по многоканальным записям волновых полей на поверхности исследуемого объема визуализировать распределение глубинных эмиссионных источников внутри среды и определять параметры излучения [1–11]. Эмиссионная томография находит применение в ионосферных исследованиях, при изучении особенностей земной коры в вулканических, сейсмоактивных и геотермальных районах. Большой потенциал метод имеет для решения задач разведочной геофизики, мониторинга процессов разработки месторождений полезных ископаемых, мониторинга эксплуатации подземных сооружений и состояния подземных хранилищ опасных отходов и газохранилищ.

Точность привязки глубинных источников и чувствительность метода зависят от точности определения времени пробега сигналов на пути от источника до приемника. Причем количество расчетных лучей может составлять  $10^9$  и более [1, 5]. Поэтому расчетные алгоритмы должны иметь хорошую точность приближения к истинному ходу луча, чтобы не ухудшать когерентность при фокусировке сигналов, но быть максимально быстрыми. В идеале отклонение расчетного и точного времени пробега сигнала должно быть не более погрешности полевого эксперимента.

Трехмерное компьютерное моделирование полноволнового акустического поля в гетерогенных средах является сложной вычислительной задачей [12]. При ее точном решении используются уравнения акустики, полученные для определенной модели среды. Могут быть применены подходы с осредненными параметрами модели [13–16] либо с явным учетом неоднородностей (поры, трещины и пр.) [17–18]. При решении уравнений акустики, проводятся их дискретизация, выбор граничных условий и итерационное компьютерное решение сеточных уравнений. При этом могут быть использованы, например, метод конечных разностей [19–20] или метод конечных элементов [21]. Сеточные методы позволяют осуществлять аккуратное моделирование с учетом дифракционных эффектов и динамических особенностей волновых полей. Они позволяют работать в низкочастотном приближении. Однако эти методы высокочастотны по времени и вычислительным ресурсам.

Лучевые методы, особенно приближенные лучевые методы [22–27], дают возможность уменьшить время компьютерных вычислений на несколько порядков, при этом обеспечивают высокую точность

по расчету времени пробега вдоль луча и углу выхода. Хотя их применимость ограничивается только высокочастотным приближением, для целей эмиссионной томографии они предпочтительны.

## Трассировка лучей в средах со сложной геометрией контрастных границ

Ранее автором был предложен приближенный лучевой метод трассировки распространения сигналов в трехмерных средах со сложной геометрией внутренних контрастных границ [1, 5, 28]. При реализации алгоритмов эмиссионной сейсмической томографии приходится не просто проводить трассировку лучей, а решать краевую задачу. А именно, рассчитывать луч, проходящий через две заданные точки: точку опроса среды (гипотетическую точку источника) и точку регистрации сигнала. При этом известны координаты двух точек, но направление луча ни в одной из точек не задано. При численном расчете лучей часто используют два метода: метод пристрелки и метод деформации луча [12]. Наш алгоритм базируется на методе деформации луча, т.к. он более эффективен при нерегулярной площадной расстановке регистрирующих датчиков, которая применяется в эмиссионной томографии.

В предложенном быстром алгоритме искажение лучей проводят с использованием идеи алгоритма Zhao [27], который дает экономию по времени расчетов в один-два порядка по сравнению с точными методами трассировки [22]. Оптимальный луч можно найти с использованием алгоритма, который иллюстрирует рис. 1. Сначала (рис. 1а) формируется исходное приближение луча между точками излучения и приема –  $A_1A_2A_3A_4A_5$ . Оно может быть выбрано произвольным образом. Затем луч искажают так, чтобы при пересечении границ раздела вспомогательными лучами  $A_1B_1A_3$ ,  $A_2B_2A_4$ ,  $A_3B_3A_5$  выполнялся закон преломления (закон Снеллиуса). Затем новое приближение луча (рис. 1б) итерационно искажается аналогичным образом. На каждой итерации рассчитывают разность времени пробега по предыдущему и последующему приближениям луча. Если сокращение времени пробега меньше наперед заданной малой величины или время пробега сигнала по лучу возрастает, то итерационный процесс прерывается. Значение малой величины пороговой разности пробега определяют требуемой точностью по времени.

Численное моделирование с использованием параметров реального полевого эксперимента [5] показывает, что для скоростных моделей с плоскими горизонтальными границами раздела алгоритм быстро и устойчиво сходится к теоретическому лучу, при этом число итераций очень слабо зависит от исходного приближения луча (рис. 2).

При деформировании большого луча точки преломления вспомогательных коротких трехточечных

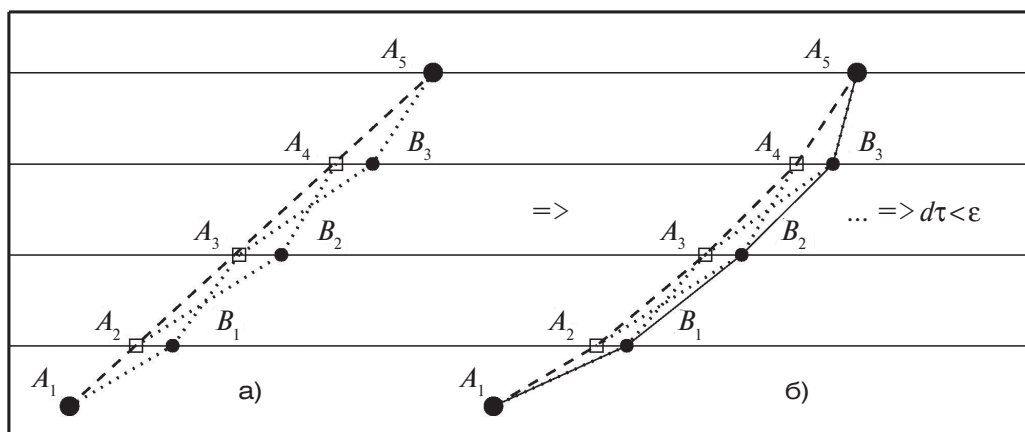


Рисунок 1. Схема деформирования луча для горизонтальной плоскослоистой скоростной модели среды [27]: а – начальное искажение луча; б – последующие искажения луча;  $A_1-A_5$  – точки пересечения текущего исходного положения луча до искажения;  $B_1-B_3$  – точки преломления коротких трехточечных лучей, удовлетворяющие закону Снеллиуса;  $A_1B_1B_2B_3A_5$  – текущее положение искаженного луча;  $d\tau$  – разница времени пробега по текущим исходному и искаженному лучу;  $\varepsilon$  – требуемая точность по времени пробега сигнала вдоль луча

лучей находят методом бисекции [28]. В случае плоских горизонтальных границ раздела особых трудностей при определении точек преломления не возникает. Однако в средах со сложной геометрией задача вычисления положения точки преломления луча на границе двух сред становится существенно нетривиальной. С использованием методов многопараметрической оптимизации автором разработаны и описаны в [28, 1, 5] метод определения точки лучепреломления на контрастной границе сложной формы и алгоритм решения двухточечной задачи приближенной трассировки луча в 3D-представлении.

Результаты численного моделирования, иллюстрирующие использование разработанного алгоритма для трассировки лучей в среде со сложной трехмерной скоростной моделью, приведены на рис. 3. Значения скоростей соответствуют реальным значениям на соответствующих глубинах. Скоростная модель трехмерная. Слои представлены набором вложенных сферических оболочек, пересеченных пачкой плоских наклонных слоев. Вертикальный срез скоростной модели показан на рис. 3. Точки источника и регистрации лежат в показанном на рисунке сечении. Как видно, предложенный алгоритм деформации луча позволяет эффективно решать двухточечную задачу расчета луча в 3D-средах со сложной геометрией границ.

**Трассировка лучей в средах с выклиниванием слоев. Результаты исследований**

Необходимо отметить одну важную деталь. На рис. 3 в процессе деформирования лучи

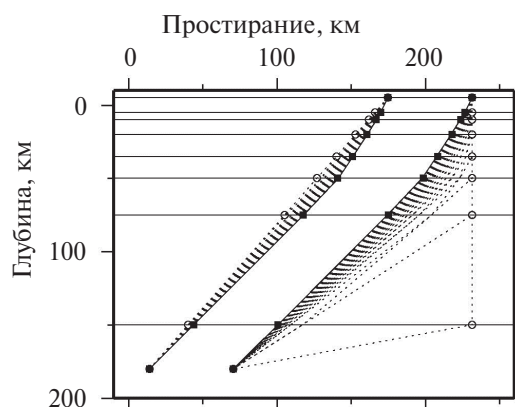


Рисунок 2. Процесс деформирования луча для горизонтально-слоистой скоростной модели с параметрами полевого эксперимента: штриховые линии – этапы деформирования; незалитые кружки – исходное приближение луча; залитые квадраты – теоретический луч; сплошная линия – конечное приближение луча

пересекают одни и те же границы раздела и число границ раздела не меняется. Условие последовательного перебора промежуточных точек пересечения заложено в логике алгоритма и является обязательным. Реальные геологические 3D-среды могут не удовлетворять условию сохранения числа слоев по простиранию. Например, может иметь место выклинивание – «постепенное или резкое уменьшение мощности пласта по простиранию до полного его исчезновения по причинам первичным – стратиграфическим (смыв перед отложением вышележащего пласта) или вторичным – тектоническим

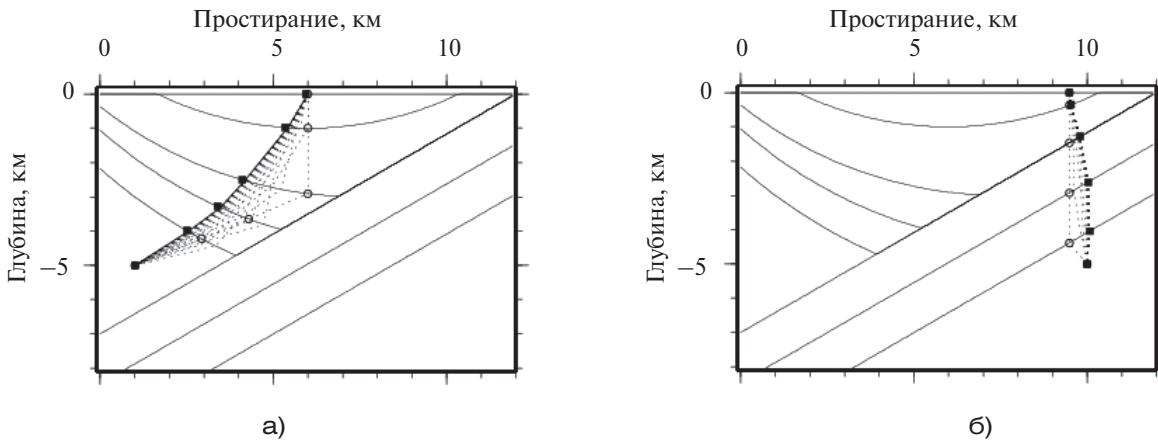


Рисунок 3. Процесс деформирования луча для слоистой скоростной модели среды со сложной геометрией границ: штриховые линии – этапы деформирования; незалитые кружки – исходное приближение луча; залитые квадраты – теоретический луч; сплошная линия – конечное приближение луча; скорости внутри слоев постоянны, соответствуют значениям реального скоростного разреза и возрастают сверху вниз от 1,6 до 4,5 км/с

(растяжение, выжимание и пр.)» [29]. Пример скоростной модели с выклиниванием показан на рис. 4а.

Чтобы формально удовлетворить условию сохранения числа слоев, надо правильно доопределить их границы так, чтобы каждый слой «существовал» на всей горизонтальной плоскости, подстилающей исследуемый объем среды. Однако при этом на некоторых интервалах толщина слоя может иметь малую толщину, значение которой задается параметром малости  $\epsilon_n$ . Физический смысл этого параметра – точность определения границ в скоростной модели. Обратимся к рис. 4. Слой 1 существует только в левой части модели, а слой 2 – только в правой. Однако, как показано на рис. 4б, если слой 1 продолжить на участке  $B_2B_3$  до правой боковой границы слоем малой толщины  $\epsilon_n$ , а слой 2 продолжить на участке  $A_1A_2$  до левой боковой границы, то число и порядок в последовательности слоев по простиранию будут сохраняться одинаковыми во всем объеме. При этом в силу малости параметра  $\epsilon_n$  на интервалах продолжения слоев они не будут вносить существенного искажения во время пробега сигнала

вдоль луча, тогда в расчетах их можно не учитывать. То есть по простиранию сохраняется вертикальная последовательность слоев, но последовательность скоростей может изменяться.

Введены также изменения в алгоритм метода 3D-бисекции по сравнению с алгоритмом, описанным в работе [28]. Обратимся к рис. 5. В методе бисекции для луча  $A_1A_2A_3$  точку преломления  $A_2$  итерационно ищут на интервале между проекциями на границу раздела концов луча  $A_{1n}$  и  $A_{3n}$ . Для резко изменяющейся формы границы результат улучшается при более локальном поиске в окрестности точки  $A_2$ , т.е. при уменьшении интервала поиска. Поэтому введен параметр локальности  $\epsilon_N$ . Он имеет следующий смысл. Если длина концов луча больше этого параметра, то она уменьшается до его значения при расчете точек проекций концов луча на границу раздела. Затем проводят проверку того, изменяются ли в точках  $A_{1n}$  и  $A_{3n}$  скорости по обе стороны границы по сравнению со скоростями в точке  $A_2$ . Если изменения скоростей имеют место, ищут точку изменения последовательности скоростей – точку выклинивания  $A_c$ . Для примера

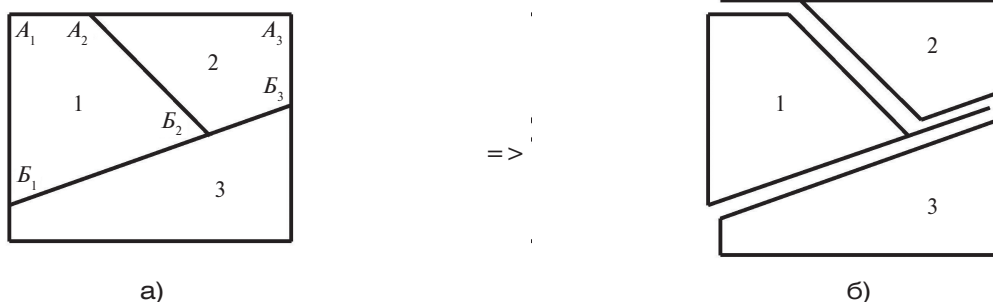


Рисунок 4. Скоростная модель с выклиниванием слоя: а – исходная слоистая скоростная модель; б – слоистая скоростная модель, дополненная параметризацией с тонкими слоями

на рис. 5 точку преломления ищут на интервале  $A_{1n}$  и  $A_{3n}$ . На интервале  $A_c A_{3n}$  последовательность скоростей не изменяется. Методом 3D-бисекции, описанным в работе [28], на этом интервале ищут положение точки преломления обычным способом. Если точка, наиболее удовлетворяющая закону преломления, достаточно далека от  $A_c$ , то это искомая точка преломления луча на границе раздела. Если она оказалась в  $\epsilon_h$ -окрестности  $A_c$ , необходимо сравнить время пробега лучей для положения точки преломления  $A_2$  по обе стороны от  $A_c$ . Выбирают позицию с меньшим временем пробега по лучу. При этом число сегментов луча может измениться. Длина принимаемых к вниманию составляющих сегментов луча, вносящих вклад во время пробега, должна существенно превышать  $\epsilon_h$ .

При описанной модификации метод трассировки лучей в 3D-средах успешно работает и в окрестности точки  $A_c$ , что иллюстрируют результаты численного моделирования, приведенные на рис. 6. Исходный луч в обоих случаях располагается справа от точки выклинивания, а теоретические точки преломления для двух лучей – по разные стороны. В одном случае (рис. 6а) луч при деформировании переходит через точку выклинивания, чтобы встать в нужную пространственную позицию. Число сегментов луча увеличивается. В другом случае (рис. 6б) в процессе итерационного деформирования он устанавливается в правильном положении справа от точки выклинивания. Число сегментов луча не изменяется.

**Выводы**

Предложенный ранее [1, 5, 28] оригинальный метод трассировки лучей в слоистых 3D-средах

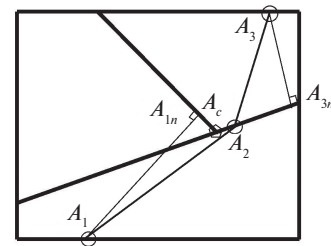


Рисунок 5. Модификация метода бисекции при выклинивании слоя:  $A_1A_2A_3$  – ход луча;  $A_{1n}, A_{3n}$  – проекции концов луча на границу раздела;  $A_c$  – точка выклинивания

со сложной геометрией границ модифицирован для использования в средах с выклиниванием скоростных слоев. Разработанный метод трассировки лучей высокоэффективен и необходим для точной привязки источников эмиссионного излучения при проведении сейсмологических и сейсморазведочных исследований, а также работ на месторождениях полезных ископаемых. В частности, на месторождениях углеводородов с зонами выклинивания связано формирование ловушек нефти и газа литологического типа [30]. Обнаружение таких зон и оценка их перспективности чрезвычайно важны при планировании сети добычных скважин.

В предложенном ранее [1, 5, 28] алгоритме трассировки лучей в слоистых 3D-средах со сложной геометрией границ использован способ параметризации скоростной модели в виде пластовой модели. В этом алгоритме при итерационном расчете луча проводят определение точек преломления для заданной последовательности границ, связанных с последовательностью скоростей.

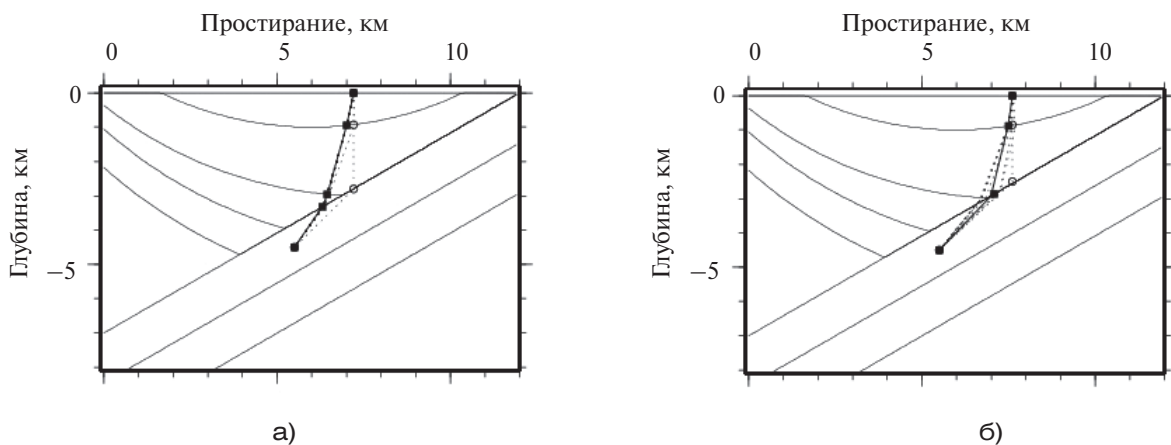


Рисунок 6. Процесс деформирования луча для скоростной модели среды с выклиниванием слоя: а – точка выклинивания расположена между начальным положением луча и конечной итерацией луча; б – начальное положение луча и конечная итерация луча расположены по одну сторону от точки выклинивания; штриховые линии – этапы деформирования; незалитые кружки – исходное приближение луча; залитые квадраты – теоретический луч; сплошная линия – конечное приближение луча

При наличии выклинивания скоростного слоя последовательность границ и скоростей изменяется. Чтобы сохранить логику алгоритма деформации луча скоростную модель при прохождении точки выклинивания доопределяют таким образом, чтобы последовательности слоев и скоростей по простиранию не изменялись. При этом продолжение границы слоя за точкой выклинивания имеет нулевую толщину, положение слоя определяют контактом подошвы вышележащего слоя

и кровли нижележащего слоя. Для повышения устойчивости работы алгоритма область итерационного поиска точки преломления уменьшена до величины, определяемой параметром локальности. В соответствии с этим внесены изменения в алгоритм 3D-бисекции.

Эффективность работы алгоритмов в случаях наличия и отсутствия точек выклинивания проиллюстрирована на результатах численного имитационного моделирования.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Статья написана в рамках выполнения государственного задания на 2018 г. (тема «Энергетика, динамика и дегазация Земли, теоретические и экспериментальные основы инновационных сейсмоакустических технологий исследования геологической среды и контроля за объектами нефтегазодобычи», № АААА-А16-116021510125-7).

## ACKNOWLEDGEMENT

The article was written in order to perform state task for 2018 (project – Energetics, dynamics and degasification of the Earth, theoretical and experimental basis of innovative seismoacoustic technologies for research geological structure and control of oil and gas production facilities, № АААА-А16-116021510125-7).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чеботарева И. Я. Трассировка лучей в методе сейсмической эмиссионной томографии // Радиопромышленность. 2017. № 1. С. 19–25.
2. Чеботарева И. Я. Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума // Акустический журнал. 2011. Т. 57. № 6. С. 844–853.
3. Чеботарева И. Я., Володин И. А. Образы процесса гидроразрыва пласта в сейсмическом шуме // Доклады РАН. 2012. Т. 444. № 2. С. 202–207.
4. Чеботарева И. Я. Эмиссионная томография – базовый инструмент для технологий изучения месторождений углеводородов [Электронный ресурс] // Актуальные проблемы нефти и газа. 2017. Вып. 2 (17). 24 с. URL: <http://oilgasjournal.ru> (дата обращения: 03.05.2018).
5. Чеботарева И. Я. Методы трассировки лучей в эмиссионной сейсмической томографии // Физика Земли. 2018. Т. 54. № 2. С. 12–24.
6. Александров С. И., Гогоненков Г. Н., Мишин В. А. Применение пассивных сейсмических наблюдений для контроля параметров гидроразрыва пласта // Нефтяное хозяйство. 2005. № 5. С. 58–63.
7. Александров С. И., Мишин В. А., Буров Д. И. Проблемы скважинного и наземного микросейсмического мониторинга гидроразрыва пласта // Экспозиция Нефть и Газ. 2015. № 6 (45). С. 58–63.
8. Chirkin I. A., Kuznetsov O. L., Volkov A. V., Meltchouk B. Y., Vorobiev A. S., Joukov A. S., Rogotsky G. V. Applying passive SLEC technology to study the dynamics of fluidal processes on oil field under production. EAGE. Passive seismic and diffraction processing, Saint Petersburg, 2008, April 7, DOI: 10.3997/2214-4609.20146796.
9. Шмаков Ф. Д. Методика обработки и интерпретации данных наземного микросейсмического мониторинга ГРП // Технологии сейсморазведки. 2012. № 3. С. 65–72.
10. Lacazette A., Vermilye J., Fereja S., Sicking Ch. Ambient fracture imaging: A new passive seismic method. Unconventional Resources Technology Conference, Denver, Colorado, USA, 2013, August 12–14, pp. 1–10. Available at: [http://www.terrexeismic.com/media/20473/ambient\\_fracture\\_imaging.pdf](http://www.terrexeismic.com/media/20473/ambient_fracture_imaging.pdf) (accessed 03.05.2018).
11. Локация источников сейсмического шума, связанного с проявлением гидротермальной активности, методом эмиссионной томографии / Ю. А. Кугаенко, В. А. Салтыков, В. И. Сеницын, В. Н. Чебров // Физика Земли. 2004. № 2. С. 66–81.
12. Сейсмическая томография. С приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике / ред. Г. Нолета. М.: Наука, 1990. 416 с.
13. Biot M. A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. Journal of Applied Physics, 1962, vol. 33, no. 4, pp. 1482–1498.
14. Механика насыщенных пористых сред / В. Н. Николаевский, К. С. Басниев, А. Т. Горбунов, Г. А. Зотов. М.: Недра. 1970. 336 с.
15. Baird G. E., Thomas P. D., Sang G. The propagation of elastic waves through a layered poroelastic medium. Journal of the Acoustical Society of America, 1996, vol. 99, no. 6, pp. 3385–3392.
16. Berryman J. G. Elastic wave propagation in fluid saturated porous media. Journal of the Acoustical Society of America, 1984, vol. 69, no. 2, pp. 416–424.
17. Левянт В. Б., Петров И. Б., Панкратов С. А. Исследование характеристик продольных и обменных волн обратного отклика от зон трещиноватого коллектора // Технологии сейсморазведки. 2009. № 2. С. 3–11.

18. Квасов И.Е., Петров И.Б., Панкратов С.А. Численное моделирование сейсмических откликов в многослойных геологических средах сеточно-характеристическим методом // Математическое моделирование. 2010. Т. 22. № 9. С. 13–21.
19. Saenger E.H., Gold N., Shapiro S.A. Modeling the propagation of the elastic waves using a modified finite-difference grid. *Wave Motion*, 2000, vol. 31, no. 1, pp. 77–92.
20. Podvin P., Lecomte I. Finite difference computation of travel times in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools. *Geophysical Journal International*, 1991, vol. 105, pp. 271–284.
21. Bermudez A., Hervella-Nieto L., Rodriguez R. Finite element computation of three-dimensional elastoacoustic vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, vol. 219, no. 2, pp. 279–306.
22. Jacob K.H. Three-dimensional seismic ray tracing in a laterally heterogeneous spherical Earth. *Journal of Geophysical Research*, 1970, vol. 75, pp. 6675–6689.
23. Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: Benchmarks for testing tomographic algorithms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2009, vol. 99 (1), no. 1, pp. 194–214.
24. Um J., Thurber C. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1987, vol. 77, no. 3, pp. 972–986.
25. Thurber C.H., Ellsworth W.L. Rapid solution of ray tracing problems in heterogeneous media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1980, vol. 170, no. 4, pp. 1137–1148.
26. Ступина Т., Кулаков И. Сложностно-структурный подход к исследованию области применимости алгоритма PROFIT [Электронный ресурс]. *International Book Series «Information Science and Computing»*, 2009, pp. 79–85. URL: [http://www.foibg.com/ibs\\_isc/ibs-15/ibs-15-p10.pdf](http://www.foibg.com/ibs_isc/ibs-15/ibs-15-p10.pdf) (дата обращения: 03.05.2018).
27. Zhao D., Hasegawa A., Horiuchi S. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *Journal of Geophysical Research*, 1992, vol. 97, pp. 19909–19928.
28. Чеботарева И.Я. Определение положения точки преломления на интерфейсах сложной геометрии при трехмерной трассировке лучей // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 3. С. 141–144.
29. Горная энциклопедия / под ред. Е.А. Козловского. М.: Советская энциклопедия, 1984–1991.
30. Бакиров А.А. Геология и геохимия нефти и газа. М.: Недра, 1982. 287 с.

## REFERENCES

1. Chebotareva I. Ya. Ray tracing in the method of seismic emission tomography. *Radiopromyshlennost*, 2017, no. 1, pp. 19–25. (In Russian).
2. Chebotareva I. Ya. Methods for passive study of the geological environment using seismic noise. *Akusticheskii zhurnal*, 2011, vol. 57, no. 6, pp. 857–865. (In Russian).
3. Chebotareva I. Ya., Volodin I.A. Images of hydraulic fracture in seismic noise. *Doklady Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 444, part 1, pp. 621–625. (In Russian).
4. Chebotareva I. Ya. [Emission tomography – basic tool for technologies for studies of hydrocarbon deposits]. *Emissionnaya tomografiya – bazovyy instrument dlya tekhnologii izucheniya mestorozhdenij uglevodorodov. Aktualnii problemi nefti i gasa*, 2017, no. 2 (17), 24 p. (In Russian). Available at: <http://oilgasjournal.ru> (accessed 03.05.2018).
5. Chebotareva I. Ya. Ray tracing methods in seismic emission tomography. *Fizika Zemli*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 12–24. (In Russian).
6. Aleksandrov S.I., Gogonenkov G.N., Mishin V.A. Application of passive seismic observations for control of hydraulic fracturing parameters. *Neftyanoe khozyaistvo*, 2005, no. 5, pp. 58–63. (In Russian).
7. Alexandrov S.I., Mishin V.A., Burov D.I. Problems of borehole and surface microseismic hydrofrac monitoring. *Jekspozicija Neft i Gaz*, 2015, no. 6 (45), pp. 58–63. (In Russian).
8. Chirkin I.A., Kuznetsov O.L., Volkov A.V., Meltchouk B.Y., Vorobiev A.S., Joukov A.S., Rogotsky G.V. Applying passive SLEC technology to study the dynamics of fluidal processes on oil field under production. *EAGE. Passive seismic and diffraction processing*, Saint Petersburg, 2008, April 7, DOI: 10.3997/2214–4609.20146796.
9. Shmakov F.D. Surface microseismic monitoring of hydraulic fracture: data processing and interpretation. *Tehnologii sejsmorazvedki*, 2012, no. 3, pp. 65–72. (In Russian).
10. Lacazette A., Vermilye J., Fereja S., Sicking Ch. Ambient fracture imaging: A new passive seismic method. *Unconventional Resources Technology Conference*, Denver, Colorado, USA, 2013, August 12–14, pp. 1–10. Available at: [http://www.terrexseismic.com/media/20473/ambient\\_fracture\\_imaging.pdf](http://www.terrexseismic.com/media/20473/ambient_fracture_imaging.pdf) (accessed 03.05.2018).
11. Kugaenko Yu. A., Saltykov V.A., Sinityn V.I., Chebrov V.N. Location of seismic noise sources associated with manifestation of hydrothermal activity, by the method of emission tomography. *Fizika Zemli*, 2004, no. 2, pp. 66–81. (In Russian).
12. Noleta G., ed. *Seismicheskaya tomografiya. S prilozheniyami v global'noi seismologii i razvedochnoi geofizike* [Seismic tomography. With applications in global seismology and exploration geophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 416 p. (In Russian).
13. Biot M.A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of Applied Physics*, 1962, vol. 33, no. 4, pp. 1482–1498.
14. Nikolaevskii V.N., Basniev K.S., Gorbunov A.T., Zotov G.A. *Mehanika nasyshhennykh poristyyh sred* [Mechanics of saturated porous media]. Moscow, Nedra Publ., 1970, 336 p. (In Russian).
15. Baird G.E., Thomas P.D., Sang G. The propagation of elastic waves through a layered poroelastic medium. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, vol. 99, no. 6, pp. 3385–3392.
16. Berryman J.G. Elastic wave propagation in fluid saturated porous media. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1984, vol. 69, no. 2, pp. 416–424.

17. Leviant V.B., Petrov I.B., Pankratov S.A. Investigation of the characteristics of longitudinal and exchange waves of the reverse response from the zones of a fractured reservoir. *Tehnologii seismorazvedki*, 2009, no. 2, pp. 3–11. (In Russian).
18. Kvasov I.E., Petrov I.B., Pankratov S.A. Numerical modeling of seismic responses in multilayer geological environments by grid-characteristic method. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2010, no. 9, vol. 22, pp. 13–21. (In Russian).
19. Saenger E.H., Gold N., Shapiro S.A. Modeling the propagation of the elastic waves using a modified finite-difference grid. *Wave Motion*, 2000, vol. 31, no. 1, pp. 77–92.
20. Podvin P., Lecomte I. Finite difference computation of travel times in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools. *Geophysical Journal International*, 1991, vol. 105, pp. 271–284.
21. Bermudez A., Hervella-Nieto L., Rodriguez R. Finite element computation of three-dimensional elastoacoustic vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, vol. 219, no. 2, pp. 279–306.
22. Jacob K.H. Three-dimensional seismic ray tracing in a laterally heterogeneous spherical Earth. *Journal of Geophysical Research*, 1970, vol. 75, pp. 6675–6689.
23. Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: Benchmarks for testing tomographic algorithms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2009, vol. 99 (1), no. 1, pp. 194–214.
24. Um J., Thurber C. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1987, vol. 77, no. 3, pp. 972–986.
25. Thurber C.H., Ellsworth W.L. Rapid solution of ray tracing problems in heterogeneous media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1980, vol. 170, no. 4, pp. 1137–1148.
26. Stupina T., Kulakov I. Slozhnostno-strukturnyi podkhod k issledovaniyu oblasti primenimosti algoritma PROFIT. In: *International Book Series «Information Science and Computing»*, 2009, pp. 79–85. (In Russian). Available at: [http://www.foibg.com/ibs\\_isc/ibs-15/ibs-15-p10.pdf](http://www.foibg.com/ibs_isc/ibs-15/ibs-15-p10.pdf) (accessed 03.05.2018).
27. Zhao D., Hasegawa A., Horiuchi S. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *Journal of Geophysical Research*, 1992, vol. 97, pp. 19909–19928.
28. Chebotareva I. Ya. Localization of refraction point at the interfaces of complex geometry under the three-dimensional ray tracing. *Voprosy radioelektroniki*, 2017, no. 3, pp. 141–144. (In Russian).
29. Kozlovskii E.A., ed. *Gornaya entsiklopediya* [Rock encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1984–1991. (In Russian).
30. Bakirov A. A. *Geologiya i geokhimiya nefti i gaza* [Geology and petroleum geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1982, 287 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Чеботарева Ирина Яковлевна**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, д.3, тел.: +7 (917) 585-81-13, e-mail: irinache@inbox.ru.

## AUTHOR

**Irina Chebotareva**, Dr., senior researcher, Oil and Gas Research Institute RAS, 3, ulitsa Gubkina, Moscow, 119333, Russia, tel.: +7 (917) 585-81-13, e-mail: irinache@inbox.ru.